

УДК 627.34

**Андрій Микитишин, к.т.н, доц., Петро Стухляк, д.т.н., проф.,
Олег Тотосько, к.т.н, доц.**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ ПОЛІМЕРКОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

Методом математичного планування досліджено вплив технологічних параметрів формування епоксикомпозитів на їх експлуатаційні характеристики. Встановлено, що суттєвий вплив на ударну в'язкість та теплостійкість композитів має температура ізотермічної обробки. Експериментально встановлено оптимальну температуру нагріву та тривалість ультразвукової обробки композиції.

Ключові слова: епоксидна композиція, ізотермічний ефект, ультразвукова обробка, теплостійкість, ударна в'язкість.

Andriy Mykytyshyn, Petro Stukhlyak, Oleh Totosko MATHEMATICAL MODELING OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS FORMING TECHNOLOGY

The method of mathematical planning has investigated the influence of technological parameters of formation of epoxy composites on their performance characteristics. It has been established that the temperature of the isothermal treatment has a significant influence on the impact strength and heat resistance of the composites.

Keywords: epoxy composition, isothermal effect, ultrasonic treatment, heat resistance, impact strength.

Технологія формування полімерних композицій має суттєвий вплив на показники експлуатаційних характеристик кінцевого продукту та на саму можливість здійснення технологічного процесу. Тому велике практичне значення має встановлення аналітичних залежностей для експлуатаційних характеристик композитних матеріалів при зміні їх режимів формування. Серед методів оптимізації досліджень на даний час найбільш широко використовується метод математичного планування експериментів. Доведено, що при проведенні експериментальних досліджень найбільш важливим є встановлення закономірностей між величинами, що оптимізуються, і факторами варіювання.

Параметрами оптимізації приймали ударну в'язкість та теплостійкість епоксидних матеріалів, отриманих при різних режимах формування. В якості незалежних змінних (факторів) технологічного процесу формування матеріалів вибрані:

x_1 – тривалість ультразвукової (УЗ) обробки композиції, τ , хв; x_2 – температура першого нагрівання при ізотермічній обробці, T_1 , К; x_3 – температура другого нагрівання при ізотермічній обробці, T_2 , К.

Для опису процесу поліномом другого порядку вибраний план повного факторного експерименту 2^3 (табл.1). Змінні та рівні варіації незалежних факторів приведені в таблиці 2.

Відповідно до матриці планування досліджували 15 режимів формування. Кожен дослід мав три паралельних визначення. Результати експерименту та середні значення ударної в'язкості та теплостійкості представлені в табл. 3 та 4 відповідно.

За отриманими експериментальними даними визначали коефіцієнти рівняння регресії. Для дослідження ударної в'язкості (табл. 3): $Y_1 = 11,16 + 0,21x_1 + 0,46x_2 + 0,33x_3 - 0,41x_1^2 - 0,53x_2^2 + 0,03x_3^2 - 0,09x_1x_3 + 0,17x_2x_3 - 0,03x_1x_2x_3$

Таблиця 1

Матриця планування

x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1^2 - (x_1'')^2$	$x_2^2 - (x_2'')^2$	$x_3^2 - (x_3'')^2$	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$
+1	-1	-1	+1	0,27	0,27	0,27	+1	-1	-1	+1
+1	+1	-1	-1	0,27	0,27	0,27	-1	-1	+1	+1
+1	-1	+1	-1	0,27	0,27	0,27	-1	+1	-1	+1
+1	+1	+1	+1	0,27	0,27	0,27	+1	+1	+1	+1
+1	-1	-1	-1	0,27	0,27	0,27	+1	+1	+1	-1
+1	+1	-1	+1	0,27	0,27	0,27	-1	+1	-1	-1
+1	-1	+1	+1	0,27	0,27	0,27	-1	-1	+1	-1
+1	+1	+1	-1	0,27	0,27	0,27	+1	-1	-1	-1
+1	-1,215	0	0	0,74	-0,73	-0,73	0	0	0	0
+1	+1,215	0	0	0,74	-0,73	-0,73	0	0	0	0
+1	0	-1,215	0	-0,73	0,74	-0,73	0	0	0	0
+1	0	+1,215	0	-0,73	0,74	-0,73	0	0	0	0
+1	0	0	+1,215	-0,73	-0,73	0,74	0	0	0	0
+1	0	0	-1,215	-0,73	-0,73	0,74	0	0	0	0
+1	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73	0	0	0	0

Таблиця 2

Рівні факторів

Вихідні дані планованого експерименту	x_1	x_2	x_3
Центр експерименту, x_{0i}	3	333	313
Інтервал варіацій, Δx_i	2	20	10
Верхній рівень ($x_i = +1$)	5	353	323
Нижній рівень ($x_i = -1$)	1	313	303
Зіркова точка ($+\alpha = +1,215$)	5,4	357,3	325,15
Зіркова точка ($-\alpha = -1,215$)	0,6	308,7	300,85

Таблиця 3

Ударна в'язкість композитів при різних умовах формування

№ дослідів	Ударна в'язкість, кДж/м ²			Середнє значення ударної в'язкості, кДж/м ²
	1	2	3	
1	9,85	9,93	9,87	9,88
2	9,91	9,95	9,84	9,90
3	10,03	10,11	9,97	10,04
4	11,32	11,25	11,24	11,27
5	9,47	9,48	9,53	9,49
6	10,95	11,06	11,12	10,04
7	11,23	11,31	11,19	11,24
8	10,78	10,91	11,03	10,57
9	9,82	9,91	10,02	9,97
10	11,01	10,87	10,94	10,94
11	9,87	9,93	9,98	9,93
12	10,54	10,63	10,68	10,62
13	10,96	11,02	11,09	11,02
14	11,06	11,28	11,24	11,19
15	11,34	11,42	11,36	11,35

Таблиця 4

№ досліджу	Теплостійкість, К			Середнє значення теплостійкості, К
	1	2	3	
1	393	396	394	394
2	398	395	396	396
3	396	398	397	397
4	401	398	403	401
5	393	395	394	394
6	394	398	393	395
7	399	404	401	401
8	395	397	393	395
9	397	392	394	394
10	396	394	397	396
11	395	394	397	395
12	398	401	396	398
13	400	402	399	400
14	401	398	403	401
15	403	406	406	405

Для дослідження теплостійкості (табл. 4): $Y_2 = 401,93 + 0,94x_1 + 1,70x_2 + 0,31x_3 - 4,13x_1^2 - 3,12x_2^2 - 0,41x_3^2 - 0,63x_1x_2 + 0,125x_1x_3 + 0,375x_1x_2x_3$

Значущість коефіцієнтів регресії визначили за t-критерієм згідно формули. Середня дисперсія відтворення: для ударної в'язкості $\sigma^2(y) = 0,05$; для теплостійкості $\sigma^2(y) = 0,72$. Табличне значення критерію Ст'юдента при числі ступеней вільності $f_2 = 30$ становить $t_{0,05} = 2,042$. В результаті відкидання незначущих коефіцієнтів рівняння регресії має вигляд: для ударної в'язкості $Y = 11,16 + 0,21x_1 + 0,46x_2 + 0,33x_3 - 0,41x_1^2 - 0,53x_2^2 + 0,17x_2x_3$; для тепло-стійкості $Y = 401,93 + 0,94x_1 + 1,70x_2 - 4,13x_1^2 - 3,12x_2^2 - 0,63x_1x_2$.

Адекватність одержаної математичної моделі перевіряли за критерієм Фішера згідно формули. Залишкова дисперсія для степенів вільності $f_1 = 4$ та $f_2 = 30$ згідно формули становить: для ударної в'язкості; $S_R^2 = 0,11$; для теплостійкості $S_R^2 = 1,15$.

Звідси, критерій Фішера для ударної в'язкості: $F_i = 2,2$, для теплостійкості $F_i = 1,6$. Для 5%-ного рівня значущості табличне значення F-критерію складає $F_p = 2,7$. Оскільки $F_p > F_i$, то можна вважати, що отримані рівняння регресії адекватно описують режими формування композиції. Отже, з отриманих рівнянь видно, що найбільшим значущим фактором є температура першого нагрівання при ізотермічній обробці, так як коефіцієнт при x_2 в обидвох випадках є найбільшим за абсолютною величиною. Із збільшенням температури (x_2) ударна в'язкість і теплостійкість збільшуються не значно. З технологічних міркувань прийнято оптимальну температуру $T_1 = 333K$.

Другою по значимості виявилась тривалість ультразвукової обробки композиції, що формується (x_1). Для поліпшення фізико-механічних та теплофізичних характеристик тривалість обробки τ потрібно збільшити. Оптимальним буде час $4 \pm 0,2$ хв. Найменш важливою є температура другого нагрівання при ізотермічній обробці. Отже, на основі аналізу результатів математичного планування приймаються наступні режими формування епоксидних композицій: тривалість ультразвукової обробки композиції $-\tau = 4 \pm 0,2$ хв.; температура першого нагрівання при ізотермічній обробці $-T_1 = 333K$; температура другого нагрівання при ізотермічній обробці $-T_2 = 313K$.